

Comparaison de techniques CND émergentes sur des pièces aéronautiques en matériaux composites

M. Georges, C. Thizy, J. Lewandowski⁽¹⁾, L. Scheed⁽¹⁾, L. Mouret⁽¹⁾, R. Dubé⁽¹⁾, P. Venegas⁽²⁾, I. Jorge⁽²⁾, I. Lopez⁽²⁾, Ph. Demy⁽³⁾

Centre Spatial de Liège, Université de Liège, Avenue du Pré Aily, 4031 Angleur, Belgique

(1) Centre Technologique en Aérospatiale (CTA), Place de la Savane, St-Hubert, Canada

(2) Centro de Tecnologias Aeronauticas (CTA), Parque Tecnológico de Alava, 01510 Minano, Espagne

(3) Université de Liège, Dpt. Aérospatiale et Mécanique, Ch. Des Chevreuils, 4000 Liège, Belgique

1. Introduction

Dans le cadre du projet ECOTAC (Efficient Composite Technologies for Aircraft Components) financé par la DG06 (Wallonie), le CSL a en charge la comparaison de technologies émergentes de Contrôle Non Destructif et qui doivent permettre d'inspecter de manière performante des structures composites à géométries complexes à base de fibre de carbone. Les 3 techniques en question sont sans contact, basées sur l'optique et/ou les lasers. Les deux premières sont des techniques de champ car elles travaillent sur base d'images. Il s'agit de la thermographie active [1] et de la shearographie [2], qui permettent d'observer à la surface de l'objet des variations locales, respectivement, de température ou de forme liées à la présence sous-jacente de défauts, ces derniers ayant des réactions différentes de la pièce environnante sous une contrainte donnée (thermique, mécanique, etc..). La troisième est la technique des ultrasons par laser qui est une technique ponctuelle qui nécessite un balayage de la pièce (C-scan) [3]. Elle combine la génération d'ultrasons par laser pulsé nanoseconde sur base d'un effet thermo-élastique, suivie de la détection des échos ultrasonores par un interféromètre mesurant les petits déplacements de la surface.

Dans le projet, une série d'échantillons de référence ou représentatifs des applications nous ont été fournis par les industriels partenaires du projet, à savoir SONACA, SABCA et TECHSPACE AERO. Le CSL a effectué les tests comparatifs sur base de ses propres équipements (shearographie – développement propre, ou thermographie – caméra non refroidie + lampes flash ou modulées), ou chez des partenaires avec qui le CSL entretient une collaboration. Ces derniers sont

- le CTA, Centre Technologique en Aérospatiale, situé à St Hubert près de Montréal, qui possède une installation d'ultrasons par laser (Tecnar), un système de thermographie active (caméra refroidie avec lampes flash de la société VisioImage) et un système shearographique (de la société Dantec Dynamics)
- le CTA, Centro de Tecnologias Aeronauticas, situé à Vitoria en Espagne, qui possède divers équipements de thermographie active (caméra refroidie + lampes flash, lampes halogènes modulées, et sonotrode pour excitation ultrasonore)
- le Département d'Aérospatiale et Mécanique de l'Université de Liège, qui développe une nouvelle technique de vibrothermographie [4] et utilise une caméra non refroidie.

Nous présenterons les différentes techniques utilisées, les échantillons et les résultats comparés sur ces derniers. Nous discuterons les avantages et inconvénients des 3 techniques au regard de ce type d'échantillons.

2. Techniques

La première technique utilisée est la shearographie dont le principe est illustré à la Figure 1(a). Un faisceau laser illumine l'objet qui diffuse la lumière vers une caméra devant laquelle est placée un dispositif permettant de séparer l'image en deux parties et de les recombinaison après que chacune d'elles

se soit réfléchi sur un miroir (configuration de Michelson). On incline un des deux miroirs de manière à introduire un décalage latéral entre les deux images (cisaillement optique ou shear en anglais). La superposition des deux images donne lieu à une figure d'interférence (shearogramme) qui est numérisée et stockée sur ordinateur. Cette opération s'effectue pendant que l'objet se déforme sous l'effet d'une contrainte extérieure, par exemple une lampe comme le montre la figure. On applique le décalage de phase et on acquiert une série de 4 images desquelles on déduit une carte de phase. De telles cartes de phase sont prises à différents instants durant la déformation et sont soustraites l'une à l'autre, montrant la dérivée du champ de déplacement subi par l'échantillon, dérivée prise dans la direction du cisaillement optique. Un défaut interne générera en surface une déformation locale qui sera observée par une densité de franges importante à l'endroit du défaut. En pratique, nous avons utilisé différents équipements commerciaux ou développés au laboratoire. Ainsi le CTA St Hubert possède un Dantec Q800 équipé de 8 diodes laser de 120mW à une longueur d'onde de 660 nm, le CSL utilise sa propre tête shearographique (1388x1038 pixels) avec une diode laser de 170 mW à 638 nm ainsi qu'une caméra développée par l'Université de Cape Town (1392x1040 pixels). Les échauffements sont soit fournis par une lampe à quartz de 750 W (système Dantec), soit par des spots halogènes de quelques centaines de Watts ou chaufferettes pour les investigations au CSL.

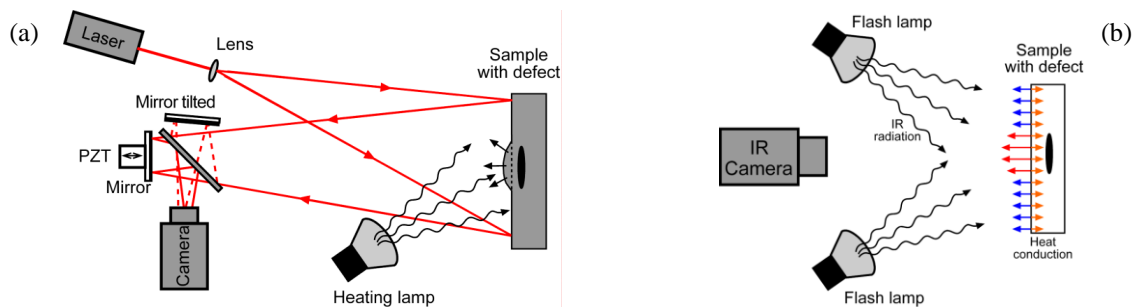


Figure 1. Principe de fonctionnement de la shearographie (a) et de la thermographie active (b)

La seconde technique utilisée est la thermographie active dont le principe est illustré à la Figure 1(b). Une ou plusieurs lampes infrarouges illuminent la surface de l'objet, générant une onde de chaleur qui se propage dans le matériau. La caméra infrarouge observe la température en surface de l'objet lorsque cette onde de chaleur pénètre dans le matériau. La présence d'un défaut va altérer la propagation de la chaleur, ce qui se verra en surface par une température différente.

Bien qu'il existe beaucoup de travaux sur ce mode d'excitation, on en distingue principalement deux, que nous avons investigués et qui sont commercialement disponibles. Le premier par lampe flash (Figure 2(a)) consiste à chauffer brièvement l'objet et d'observer la décroissance en température de l'objet. La courbe de décroissance sera différente entre la pièce saine (T_s) et la zone défectueuse (T_d). L'analyse des séries de thermogrammes permet de détecter l'instant de visibilité du défaut et d'en déterminer la profondeur z selon la loi $z \sim t^2/\alpha$ où α est la diffusivité thermique du matériau environnant [1]. Une analyse de Fourier (Pulse Phase Thermography) permet d'extraire des images à différentes fréquences temporelles (en phase et en amplitude). Les images à basses fréquences montrent les champs de température les plus profonds et donc permettent de détecter des défauts plus profonds que les images à hautes fréquences.

Le second mode d'excitation est la modulation des lampes pour lesquelles une fréquence temporelle est utilisée (Lock-In Thermography). La technique consiste à acquérir 4 thermogrammes à chaque quart de la période T de la modulation. Des algorithmes similaires au décalage de phase temporel en interférométrie permettent d'obtenir des images de phase qui montrent le déphasage thermique différent à l'endroit du défaut par rapport au matériau environnant. Tout comme pour l'analyse fréquentielle en mode pulsé, une lampe modulée à basse fréquence permettra d'obtenir une cartographie des défauts plus profonds qu'avec une haute fréquence de modulation. Les techniques pulsée et modulée donnent donc des résultats similaires, à ceci près que la pulsée excite toutes les fréquences simultanément et est donc plus rapide dans l'interprétation. La technique modulée est plus lente, en particulier avec les composites qui réagissent plus lentement au passage de l'onde de chaleur

que le métal, par exemple. Ainsi des périodes de modulation de plusieurs secondes, voire dizaines de secondes, sont nécessaires pour obtenir des images des défauts profonds. La technique modulée donne cependant des résultats généralement de meilleure qualité que la technique pulsée.

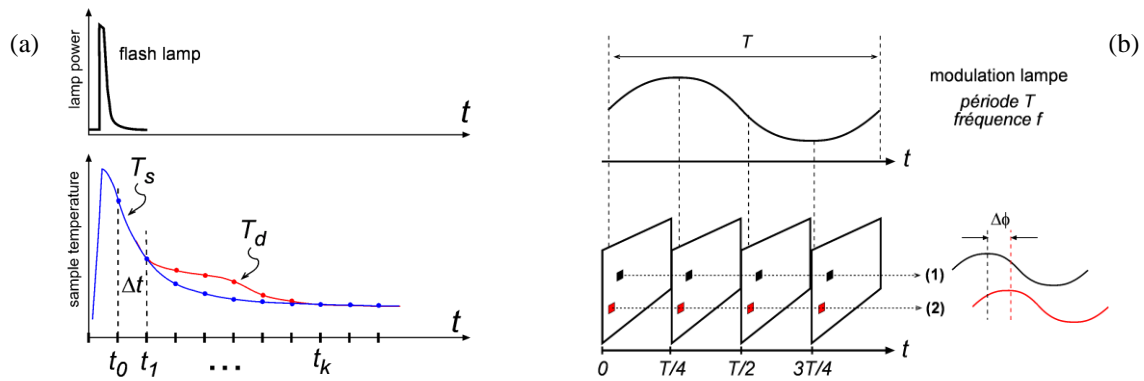


Figure 2. Principe de fonctionnement de la thermographie pulsée (a) et modulée (lock-in) (b)

Dans le projet, nous avons utilisé les deux techniques avec des matériels provenant de fabricants divers. Le CTA Minano (Espagne) utilise une caméra refroidie FLIR SC5000, avec une résolution de 320x256 pixels. En mode pulsé, 2 lampes de 6 kJ ont été utilisées et en mode lock-in 2 lampes halogènes de 3000 W. Les équipements de contrôle des lampes ont été fournis par Edevis. Le CTA St Hubert utilise une caméra refroidie Telops de 640x512 pixels avec une lampe flash annulaire de 3 kJ, les équipements de contrôle et le post-traitement sont fournis par la société VisioImage (Québec).

Une alternative intéressante à la thermographie classique par lampe est la vibrothermographie. Il s'agit ici d'excitation mécanique, l'énergie est appliquée au spécimen au moyen d'oscillations mécaniques utilisant un transducteur ultrasonique (sonotrode) ou à plus basse fréquence mécanique (piezo, shaker) qui est mis en contact avec le spécimen, le plus souvent au travers de milieu couplant. En vibrothermographie, le défaut est excité de manière interne et l'énergie mécanique est dissipée aux discontinuités sous forme de chaleur qui se propage dans le matériau par conduction jusqu'à être visible en surface. L'effet est assez rapide, en comparaison de la thermographie utilisant le chauffage externe par lampe. Le mode de travail utilisé est la vibrothermographie Lock-In, mais le mode pulsé existe aussi. Le matériel utilisé au CTA Espagne provient de chez Edevis. Deux configurations sont utilisables: soit la sonotrode fixement attachée à un bâti qui permet de la mettre en contact avec la pièce (via un système pneumatique - Figure 3(a)), soit la sonotrode est attachée à un dispositif manuel qu'un opérateur met en contact à la pièce et peut changer aisément la position (Figure 3(b)). L'autre système vibrothermographique (Figure 3(c)) utilisé est celui développé dans le cadre d'une thèse à l'Université de Liège et qui utilise des petits shakers, avec la pièce collée au shaker.

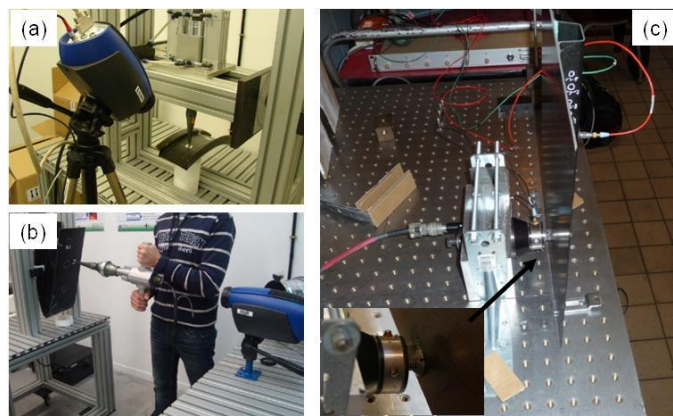


Figure 3. Vibrothermographie. (a) sonotrode dans un système pneumatique, (b) sonotrode avec support manuel, (c) shaker piezo collé à la pièce

La troisième et dernière technique considérée dans le projet est les ultrasons par laser. Elle nécessite deux étapes. Tout d'abord la génération d'ultrasons par un laser pulsé nanosecondes focalisé à la surface du matériau (Figure 4(a)). L'impact ultrabref va échauffer le matériau qui va se dilater localement et générer des ondes ultrasonores dans le matériau par effet thermoélastique non destructif. Il existe aussi un mode ablatif qui apparaît au-dessus d'un certain seuil de densité d'énergie, qui dépend notamment du matériau et de la longueur d'onde laser, qui est légèrement destructif en surface du matériau. Il est utilisé principalement pour appliquer les US Laser pour les mesures d'épaisseur dans les aciéries. Dans le cas des composites, il faut l'éviter en restant dans le régime non destructif thermoélastique pour conserver l'aspect cosmétique de la surface du matériau. La détection est assurée par un interféromètre à mixage d'ondes utilisant un cristal photoréfractif et un laser YAG à longues impulsions (80 μ s) de la société Tecnar (Figure 4(b)).

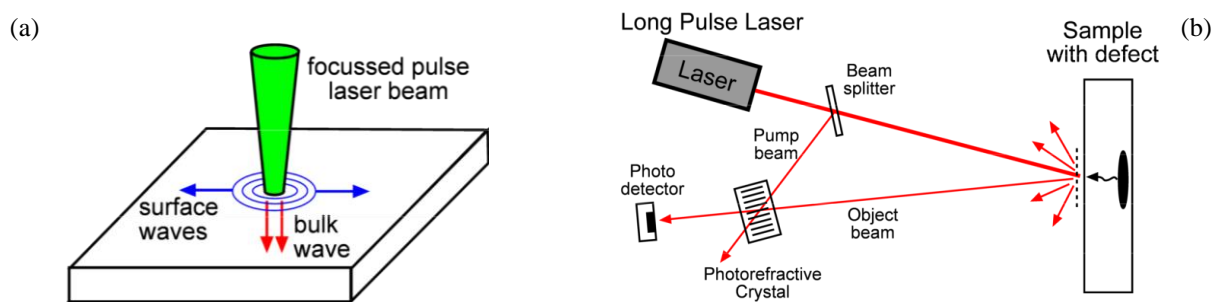


Figure 4. Principe de fonctionnement des ultrasons par laser: (a) génération par effet thermoélastique, (b) détection par mixage d'ondes dans un cristal photoréfractif

La figure suivante montre l'équipement Tecnar au CTA St Hubert et utilisé dans l'étude. La sonde optique qui combine les faisceaux de génération et détection est attachée à un bras-robot 6 axes. La génération est assurée par un laser TEA-CO₂ (10,6 μ m) amené jusqu'à la sonde par un bras-articulé. Le faisceau de détection et le faisceau retour de la cible sont véhiculés par des fibres optiques. Le laser de détection, l'unité de détection contenant le cristal photoréfractif et le laser de génération sont tous situés dans un local adjacent.



Figure 5. Equipement ultrasons laser du CTA St Hubert.

3. Echantillons

La figure suivante montre les 4 échantillons en composite à base de carbone (CFRP) utilisés pour l'étude comparative. L'échantillon 1 consiste en un raidisseur oméga sur une plaque principale, avec une série d'inserts de téflon et de flash breaker insérés à différentes profondeurs, ainsi qu'entre le raidisseur et la plaque principale. L'échantillon 2 est un tronçon de bord d'attaque avec un raidisseur sur la partie intérieure, et une série d'inserts téflon entre le raidisseur et la peau extérieure. L'échantillon 3 est un tronçon d'une pièce à géométrie cylindrique avec une série de marches. Cette

pièce est faite principalement de fibres de carbone avec un pli de fibre de verre en surface. Des inserts en téflon et métalliques sont positionnés en-dessous du pli de verre (zone bleue face avant, zone rouge face arrière) ainsi qu'au centre (partie verte) entre des plis de carbone à mi-profondeur. L'échantillon 4 est constitué d'un panneau avec des renforts en I sur une face et des raidisseurs oméga sur l'autre face. Les différents défauts sont des inserts de téflon et de flashbreaker introduits à différentes étapes du processus de fabrication.



Figure 6. Echantillons en CFRP utilisés dans l'étude

4. Résultats

La Figure 7 présente les résultats sur l'échantillon 1. On peut voir au centre une photo du raidisseur prise du dessus avec l'ensemble des défauts répertoriés. A gauche, nous pouvons voir les images obtenues au CTA Espagne par thermographie pulsée et lock-in sur l'ensemble du raidisseur. Seuls quelques défauts proches de la surface sont visibles. Il en va de même pour la shearographie avec sollicitation thermique (chaufferette).

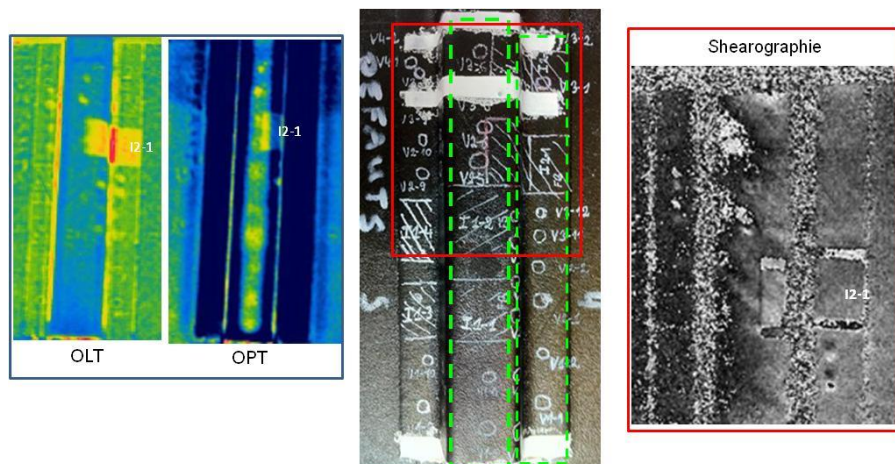


Figure 7. Résultats obtenus sur l'échantillon 1 par thermographie, shearographie et ultrasons laser.

La vibrothermographie a aussi été testée, tout d'abord l'ULg (échantillon collé au piézo – cfr Figure 3(c)) puis au CTA Espagne (Figure 8). Peu de résultats concluants, comme le montre la Figure 8, sauf sur les flash breaker (FB). Ces échantillons ont ensuite été réexaminés au CTA St Hubert, par shearographie, thermographie et ultrasons laser (Figure 9). Les conclusions sont relativement similaires en ce qui concerne la thermographie et la shearographie. Par contre nous pouvons observer

en thermographie et shearographie (flèche jaune) un défaut qui n'était pas visible précédemment. Ce dernier semble localisé à un endroit où la sonotrode a été appliquée lors du test en vibrothermographie au CTA Espagne. Il s'agit vraisemblablement d'un délaminage créé par l'échauffement intense dû à la sonotrode appliquée avec force à cet endroit. Ceci est corroboré par l'image en ultrasons laser qui montre très bien tous les défauts, avec en noir les défauts les plus proches de la surface (dont le délaminage accidentel) puis en gris les interfaces plus profondes (défauts, face arrière en gris clair).

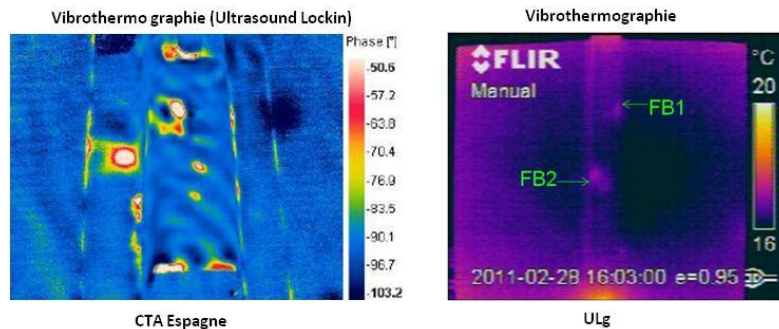


Figure 8. Résultats obtenus sur l'échantillon 1 par vibrothermographie.

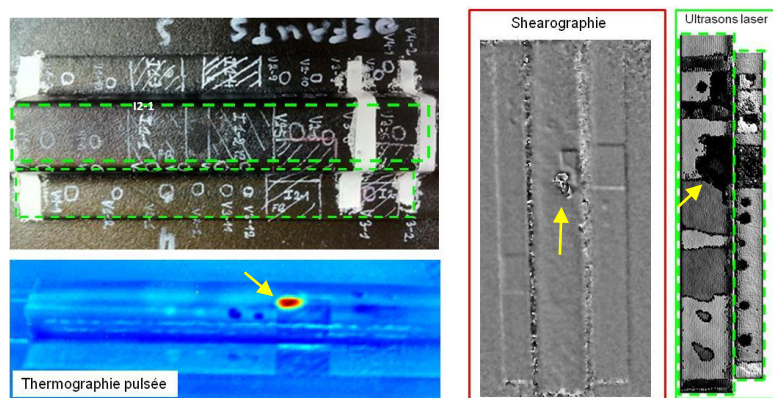


Figure 9. Seconde série de résultats obtenus sur l'échantillon 1 par thermographie, shearographie et ultrasons laser. L'image par thermographie est prise de biais, montrant le haut, le côté et le bas du raidisseur. La flèche jaune montre le défaut accidentel dû à la sonotrode.

La Figure 10 présente les résultats sur l'échantillon 2. Cette pièce a donné peu de résultats concluants en thermographie classique et en shearographie. Les défauts, bien que larges, sont relativement profonds et peinent à donner une signature différenciée. Un très bon résultat a été obtenu par vibrothermographie à l'ULg. Le C-scan par ultrasons laser donne les résultats les plus concluants. Au centre une image de la pièce avec les différentes zones observées avec les différentes techniques.

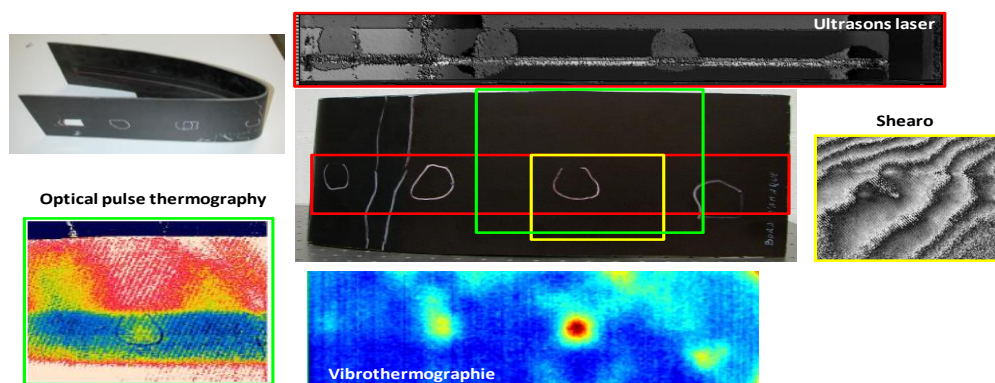


Figure 10. Comparaison des résultats sur l'échantillon 2

La Figure 11 présente les résultats sur l'échantillon 3. La ligne supérieure montre les résultats obtenus en observant la face concave par thermographie (lock-in et pulsé) et shearographie, la ligne inférieure ceux obtenus par les mêmes techniques en observant la face convexe. Seuls sont observés les défauts très peu profonds du côté de l'observation. Les défauts profonds du centre de la pièce ne sont pas visibles. En revanche, les ultrasons laser ont permis de voir la plupart des défauts sur base d'un examen à partir d'une face, comme l'illustre le C-scan au centre.

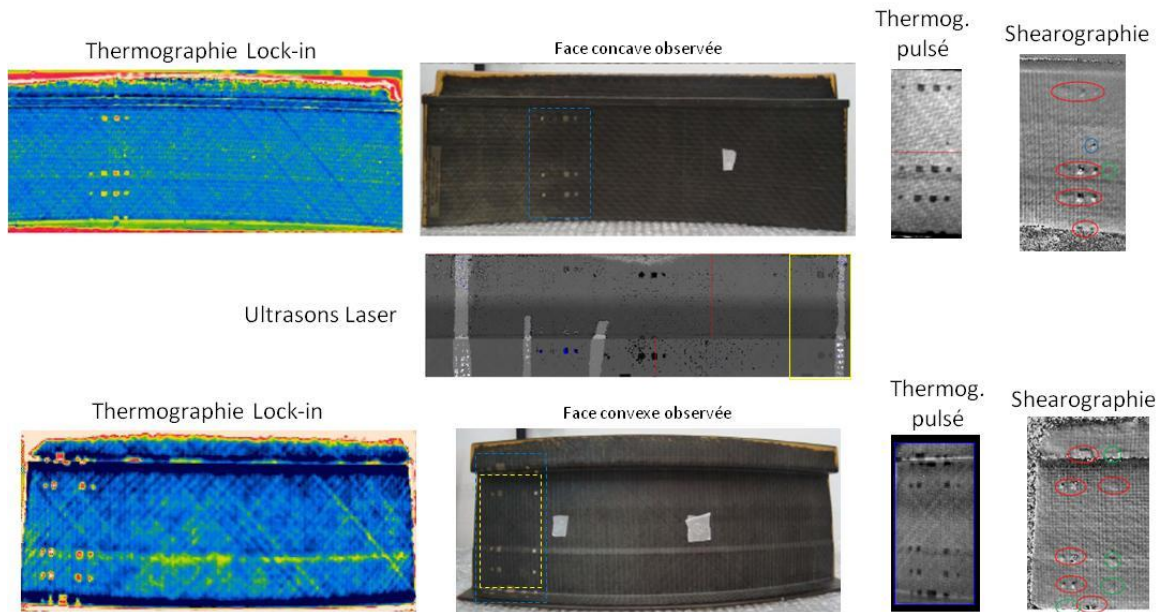


Figure 11. Comparaison des résultats sur l'échantillon 3

L'échantillon 4 étant plus imposant que les 3 autres, il n'a pas été possible d'observer toute la pièce avec les différentes techniques. Nous nous contenterons de donner quelques résultats significatifs. La Figure 12 montre en haut à droite un défaut difficile à observer, situé dans un angle, et qui a été uniquement observé par thermographie au CTA de St Hubert par thermographie pulsée avec une lampe annulaire très concentrée sur la zone observée et une caméra refroidie. Des résultats similaires ont été obtenus par thermographie et shearographie (en bas) sur une zone, tandis que sur une autre zone (à gauche), la shearographie a permis d'observer aisément des défauts que la thermographie n'a pas (ou que très peu) permis de mettre en évidence. La profondeur de ces 3 défauts est reprise dans la figure à gauche.

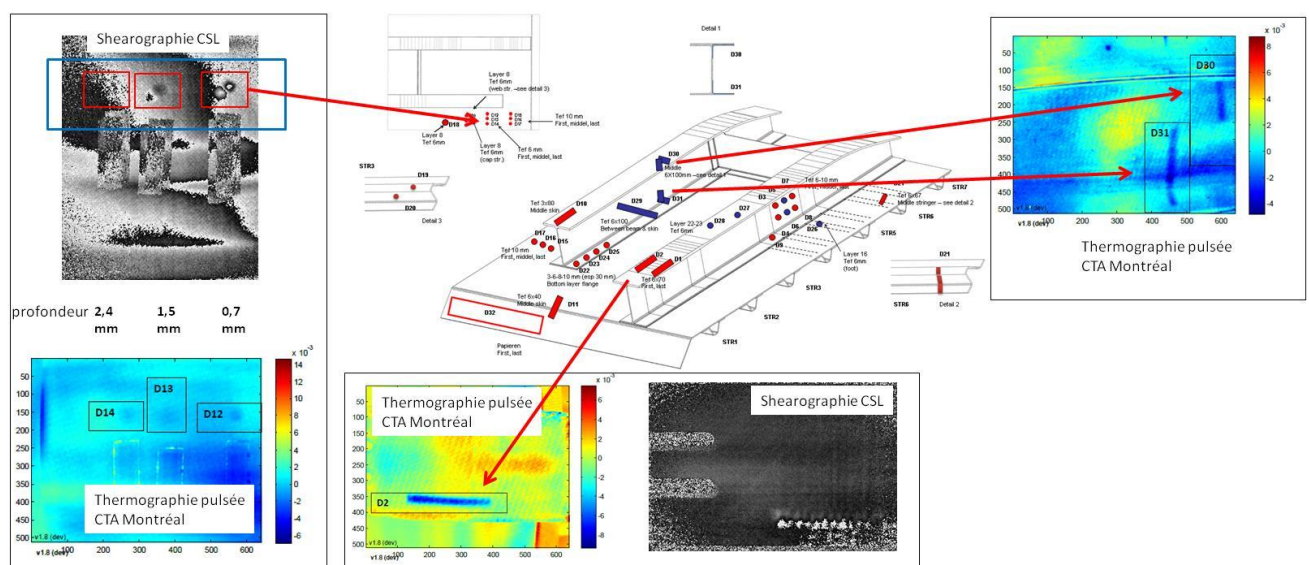


Figure 12. Quelques résultats sur l'échantillon 4 par shearographie et thermographie

La Figure 13 montre les résultats obtenus au CTA St Hubert par ultrasons laser sur 2 zones distinctes, de chaque côté de l'échantillon. Les différentes couleurs montrent les différentes profondeurs obtenues en temps de vol. Les défauts (inserts) sont visibles dans les images en temps de vol. Des images en amplitude peuvent aussi être obtenues (en bas à droite).

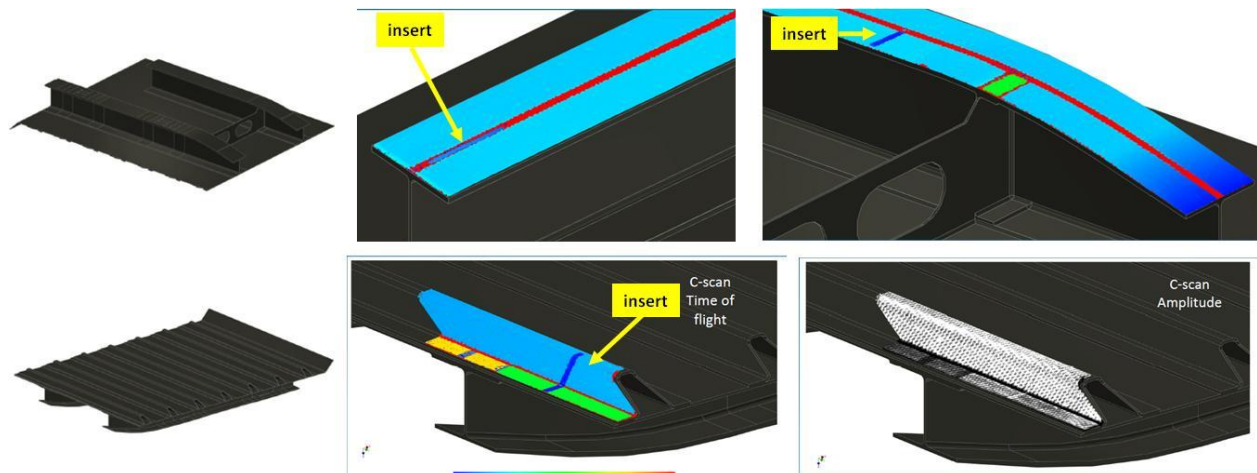


Figure 13. Quelques résultats sur l'échantillon 4 par ultrasons laser.

5. Discussion - conclusions

Les résultats présentés ci-dessus nous ont permis de tirer les enseignements suivants. Les techniques de champ (thermographie et shearographie) présentent l'avantage d'être rapidement mises en place et de ne pas nécessiter de balayage (sauf pour juxtaposer des images de zones différentes pour les grands objets). Comparant les deux, les images thermographiques sont plus aisées à interpréter que les images shearographiques. Cela est dû essentiellement à la nature même des grandeurs mesurées. La shearographie étant de nature interférométrique, les pièces à géométrie complexe génèrent souvent des franges d'interférence qui handicapent la lisibilité des interférogrammes. Dans le cas des deux techniques, la profondeur des défauts observés est limitée. Il est reconnu que ces techniques permettent d'observer des défauts dont l'étendue transverse est plus importante que leur profondeur. Cela semble assez évident pour la thermographie qui est limitée par la diffusion de la chaleur qui induit une perte de contraste quand la profondeur augmente [1]. Lorsque les techniques interférométriques telle la shearographie sont utilisées avec une sollicitation en température, une déformation locale due à un défaut sous-jacent pourrait se voir, même si la diffusion empêche de le déceler par thermographie. C'est ce que nous avons observé pour certains défauts. Cependant, cela ne peut être généralisé. Avec les défauts que nous avons dans nos échantillons, nous sommes arrivés à détecter de manière ultime de défauts profonds de 1,5 à 2 mm, avec des extensions latérales de 3-4 mm. Mais tous les défauts n'ont pas été décelés. Il faut relativiser cependant ces conclusions. En effet, les échantillons contiennent des inserts de téflon qui représentent des délaminages lorsqu'ils sont étudiés avec des ultrasons (le téflon coupant les ultrasons tout comme l'air). Cependant, lorsque l'on étudie ces mêmes échantillons avec la thermographie et la shearographie et une sollicitation quelconque, nous ne faisons qu'observer la réponse locale d'inserts de téflon à cette sollicitation, et non pas la réponse d'un vrai délaminage. Dès lors, les conclusions que l'on tire sur l'usage de la thermographie et de la shearographie ne peuvent qu'être, à notre sens, partiellement valides. Il serait plus approprié d'avoir de vrais délaminages ou, à défaut d'être capable d'en créer artificiellement, des trous à fond plat pourraient mieux représenter des délaminages au sens de ces 2 techniques de champ. C'est un sujet qui mériterait qu'on l'étudie plus en profondeur.

Pour en terminer avec les techniques de champ, on les oppose souvent aux techniques à balayage (par ultrasons notamment) car elles sont sensées donner des résultats plus rapidement. En fait, il faut aussi relativiser cette assertion car il faut appliquer une sollicitation qui peut s'avérer longue (dizaines de seconde, voire quelques minutes pour la thermographie lock-in, p.ex.) ou très brève (thermographie pulsée, shearographie) mais nécessitant l'acquisition d'une série d'images de quelques dizaines de

secondes pour suivre l'évolution de la réponse du défaut et appliquer des post-traitements (Transformée de Fourier, p.ex.). La vibrothermographie permet de limiter la durée de la sollicitation car l'échauffement est obtenu beaucoup plus rapidement (quelques secondes). Par contre, elle ne donne pas toujours des résultats probants et les défauts apparaissent ou pas en fonction de la position de la sonotrode. De plus, nous avons pu observer des effets destructifs sur un échantillon. Il faut donc prendre cette technique avec précaution, mais elle mérite certainement qu'on s'y attarde.

Enfin la technique des ultrasons par laser donne des résultats similaires aux ultrasons classiques, en termes de profondeur de défauts qui est plus importante qu'avec les autres techniques. Nous avons pu observer des échos de face arrière de la pièce à des profondeurs de l'ordre du centimètre. La littérature nous montre qu'elle permet d'inspecter des pièces de géométrie complexe sans problème de déphasage lié à la courbure. Son grand avantage est qu'elle ne nécessite aucun contact avec la pièce, ni de piscine d'immersion. Par contre elle requiert un balayage. La dimension du spot utilisé est de 2 mm, avec un pas de balayage de 0,5 mm et une fréquence de tir de 100 pulses/seconde. Cela nous a permis de détecter des défauts de l'ordre de 2 mm à des profondeurs supérieures à ce que peuvent donner les techniques de champ.

Au niveau du coût global, les ultrasons laser reviennent actuellement encore plus chers que les deux autres techniques, mais elle est beaucoup plus mature que ces dernières en termes d'interprétation des résultats. La thermographie est selon nous plus mature et aisée à interpréter que la shearographie dans le cas de pièces complexes, ce qui laisse la place à des développements futurs en shearographie. En définitive il apparaît que ces techniques doivent s'envisager en complémentarité et que les investiguer au cas par cas, en fonction du type de pièce et de défauts recherchés, est nécessaire avant de conclure sur la performance de leur utilisation.

6. Remerciements

Ces travaux ont été effectués dans le cadre du projet ECOTAC (Composite Technologies for Aircraft Components) financé par la DG06 (Wallonie), convention N° 6490. Les résultats obtenus au CTA St Hubert ont aussi reçu le soutien financier de l'Agence Wallonie-Bruxelles International (WBI).

7. Bibliographie

1. X. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, Wiley Interscience, 2001
2. W. Steinchen, *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing*, SPIE-International Society for Optical Engineers, 2003
3. J-P. Monchalin, "Laser-ultrasonics: from the laboratory to industry", Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conference Proceedings, Vol. 700, pp. 3-31, 2004
4. Ph. Demy, "Détection d'endommagement de structures en matériaux composites CFRP par vibrothermographie", CMOI, Lille, 2011